

厚岸湾表層におけるプランクトン群集による溶存有機窒素の生成に関する研究

東京大学海洋研究所海洋生化学部門

長谷川 徹

はじめに

海洋生態系における主たる低次生産を担っているのはプランクトン群集であり、一次生産者として植物プランクトン、二次生産者として動物プランクトン、細菌を挙げることが出来、動物プランクトンはそのサイズによりネット、および微小動物プランクトンに分類される(図1)。これらの生産は様々な生物的・非生物的な要因によって支配されるが、中でも重要な要因の1つと考えられているのが窒素の供給である。

海洋中での窒素はその存在形態によって3つのグループに大別される(図2)。有機態窒素の区別は一般にろ過により行われ、殆どのプランクトン群集が含まれる懸濁態有機窒素と0.2 mm以下の溶存態有機窒素(以下DON)に分けられる。海洋表層ではDONの現存量が相対的に大きく、少なくともその一部はプランクトン群集の窒素源として重要であると考えられてきた。

DONの生成に関しては様々な栄養段階の生物が関わっていることが間接的な証拠から推測されている。それらのプロセスとして(1)植物プランクトンによるDONの漏出、(2)動物プランクトンの摂餌・排泄に伴うDONの生成、(3)細菌群集による懸濁態有機物の分解過程でのDONの溶出などを挙げることができ(3)は主に中・深層への沈降過程で重要と考えられる。しかしDONが非常に多くの化合物により構成されていること、構成比が時空間的に変化すること、DONの存在量が非常に大きいこと、その濃度変化を検出し難いこと、消費と生成のプロセスが同時に存在することなどの理由によりDONの動態に関する知見は最近までごく限られたものであった。

海洋生態系における窒素循環の研究において窒素の安定同位体である ^{15}N トレーサーの果たした役割は大きい。最近DONについてもこれらの分画における ^{15}N 量の測定法が開発され、DONの動態に関する知見が蓄積しつつある。しかしDONの動態に、植物プランクトン、微小動物プランクトンおよびネット動物プランクトンがどの程度寄与しているかは明らかでなかった。

本研究は北海道厚岸湾を沿岸生態系のモデルとして選び、表層水中のプランクトン群集をサイズ分画等の処理後、 ^{15}N トレーサー実験を行うことによって、沿岸表層域におけるDON生成に対するそれぞれのプランクトンがどの程度寄与しているのかを見積もり、さらに他の窒素グループに比べてDONが窒素循環の中で果たす役割を評価することを目的とした。

結果と考察

1. 厚岸湾の特性

厚岸湾は比較的閉鎖性の高い湾であり、最大水深約30m、面積は128.4km²となっている。この湾の一次生産は他の中緯度域の湾に比べ高いことが知られている。実験期間中の水温、無機態窒素、クロロフィルaの季節変化を図3に示した。

2. 微小プランクトン群集（94 mm以下）によるDON生成

厚岸湾表層水中の94 mm以下の分画においては、植物プランクトンの大部分、原生動物、後生動物の幼生、細菌が含まれる。これらの生物のDON生成への寄与を見積もるため、1998年3月から11月の異なる季節において以下の実験を行なった。

(1) ¹⁵NH₄⁺ 添加による植物プランクトンの評価

海洋表層における一次生産の大部分は植物プランクトンにより担われ、従属栄養生物の大部分はこの有機物生産を何らかの形で利用している。植物プランクトンの現存量が高い沿岸表層域においてはNH₄⁺の大部分は植物プランクトンに取り込まれ有機物へと合成される。このため培養実験の開始と同時に¹⁵NH₄⁺を添加した場合比較的短時間の内に生成される¹⁵NでラベルされたDON（以下DO¹⁵N）は主に植物プランクトンにより漏出されるものと考えられる。

¹⁵NH₄⁺を添加した後、明条件下で12時間の培養実験を行ない各態窒素中の¹⁵N量の経時変化を求めた。アンモニア態窒素中の¹⁵N量は時間とともに直線的に減少し一方、懸濁態窒素中の¹⁵N量は直線的に増加した（図4）。これは主に植物プランクトンの¹⁵NH₄⁺の取り込みによると考えられる。一方DON中の¹⁵N量は経時的に増加して行くものの増加率は徐々に下がって行くことが観察された。これは生成されたDONが細菌により消費されていることを示唆するものである。

またプランクトン群集構造の違いがDONの生成過程に及ぼす影響を評価するためにメッシュサイズ20 mmと94 mm のプランクトンネットでサイズ分画を行ない、それぞれに¹⁵NH₄⁺を加え明条件下で培養実験（1および6時間）を行なった。全有機態¹⁵N生産に対するDO¹⁵Nの放出量の百分率（PER）は、¹⁵NのPONへの取り込みが2つの分画で殆ど変わらない6月を除くと94 mm以下の分画に比べ20 mm以下の分画で高い値を示した（表1）。この結果は小型の植物プランクトンは大型のものに比べてDON生成の効率が高いことを示すものと考えられた。

(2) 希釈法による微小動物プランクトンの評価

微小動物プランクトンはネット動物プランクトンに比べ単位炭素量当りの摂餌速度および呼吸速度が高いことが報告されており窒素循環に果たす役割も高いことが期待される。しかし微小動物プランクトンの大きさの分布はその餌生物である植物プランクトンと重なっているため(図2)、天然プランクトン群集を扱う際には、上記のようなサイズ分画法では微小動物プランクトンのDON生成に果たす役割を評価することは困難である。本研究では微小動物プランクトンによる摂餌速度を見積もるのに利用される希釈法と ^{15}N トレーサー実験を組み合わせることにより微小動物プランクトンのDON生成に対する寄与を見積もった。 $^{15}\text{NH}_4^+$ を加え数日の前培養を行ない餌生物である植物プランクトンを ^{15}N でラベルした。この海水を用いて希釈系列を作成し暗条件下で6および12時間の培養実験を行なった。すべての実験において無希釈(100%)の海水では DO^{15}N の増加が認められたが希釈の程度に応じて DO^{15}N がより減少する傾向が見られた(図5)。植物プランクトンおよび微小動物プランクトンを DO^{15}N 生成要因、細菌をその消費要因としてモデルをたてて重回帰分析を行なうと DO^{15}N の生成者として微小動物プランクトンを挙げることができた。 DO^{15}N の生成と細菌による消費は良く釣り合いが取れており、培養時間内に生成されたものの58~103%に当たる DO^{15}N が消費されていた(表2)。

ネット動物プランクトン(Copepods)によるDONの生成

Copepodsは海洋生態系の代表的なネット動物プランクトンであり、植物プランクトンとCopepodsの間の捕食、被食の関係は古くから重要なものとして認識されてきた。厚岸湾のCopepodsのDON生成に対する寄与を見積もるため、1998年3月~11月の各季節において $^{15}\text{NH}_4^+$ を加え数日の前培養を行なった試水にCopepodsを加えて6および12時間の培養実験を暗条件下で行なった。 ^{15}N トレーサーの懸濁態分画からの除去とCopepodsの体内への蓄積を比較すると、除去されたものの内25から91%もの窒素が未回収となった(図6)。この主要な原因として餌の一部を周囲の海水中に食べこぼすいわゆる“sloppy feeding”を挙げることができこれら溶存化したものかなりの部分が有機物であることが示唆された。一方、DON中に ^{15}N トレーサーは殆ど回収されなかった。これは上記の実験でも観察されたように生成されたDONが細菌により消費されることによると考えられた。

厚岸湾表層におけるDON生成に対する各生物群集の寄与

1998年3～11月におけるの3～5回の¹⁵Nトレーサー実験の結果から得られた厚岸湾表層生態系における植物プランクトン、微小動物プランクトンおよびCopepodsのDON生成に対する寄与を図7にまとめた。Copepodsはかなり効率よくDONを生成することが示唆されたが、現場でのCopepodsの現存量が低いいため単位試水あたりの生成に対する寄与は他の生物群集と比較すると小さいことが明らかになった。一方本研究期間中の現場における無機態窒素濃度は11月を除いて低い為、サイズ分画法でのアンモニアの添加は植物プランクトンによるDON生成を過大評価している可能性がある。それにもかかわらず微小動物プランクトンによるDON生成に対する高い寄与率が推定されていることは厚岸湾表層生態系におけるこの生物群集のDON生成に対する重要性を示すものと考えられた。一方、微小動物プランクトンにより生成されるDONの窒素量は同じ系内で再生産されるアンモニアの窒素量の59%に匹敵することが明らかとなった。

まとめ

厚岸湾表層生態系におけるDON生成に微小動物プランクトンが重要な働きを果たしていることが明らかとなった。またDON生成のプロセスの如何にかかわらず生成されたDONは速やかに細菌により消費されることが示唆された。DONは表層生態系の重要な窒素源であり、回転時間の速いDONプールが存在することが明らかになった。

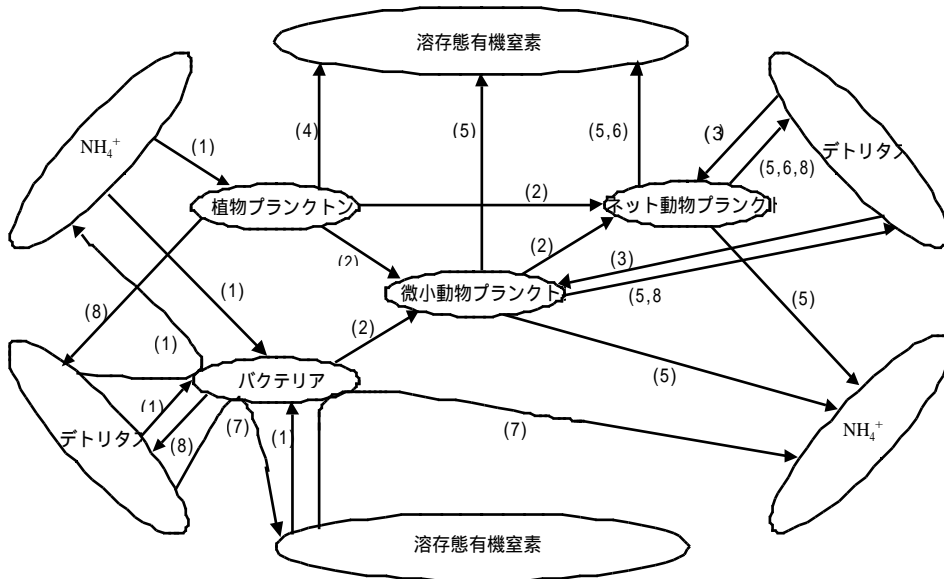


図1 沿岸表層生態系の代表的な生物群集、および窒素循環の概念図。(1)吸収、(2)捕食、(3)摂餌、(4)漏出、(5)排泄、(6)食べこぼし、(7)分解、および(8)死。

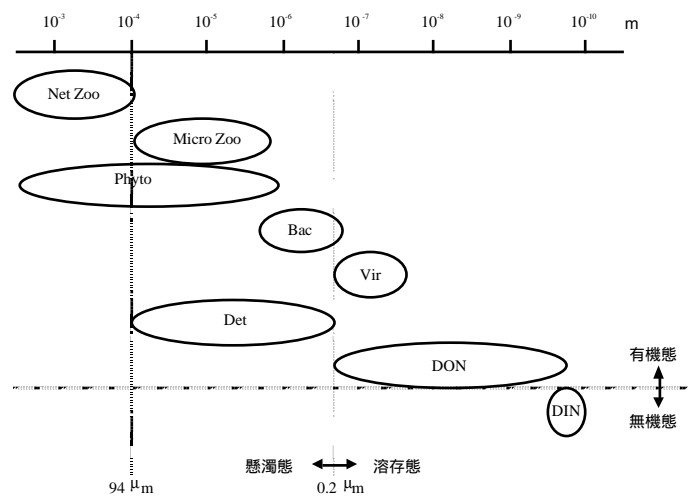


図2 海洋表層における窒素の存在形態。Net Zoo: ネット動物プランクトン、Micro Zoo: 微小動物プランクトン、Phyto: 植物プランクトン、Bac: バクテリア、Det: デトリタス、Vir: ウィルス、DON: 溶存態有機窒素(蛋白質、腐食酸、アミノ酸、尿素など)、無機態窒素(NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-)。

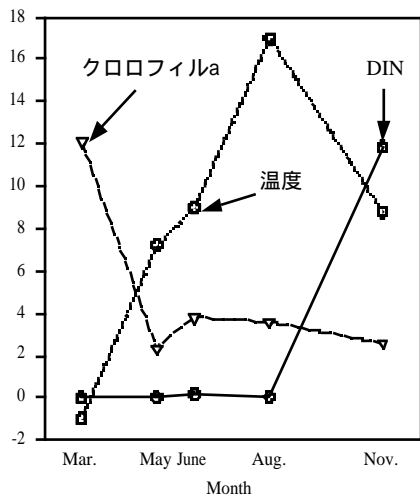


図3 厚岸湾表面海水(1998年)の温度(○)、無機態窒素濃度(DIN: $\mu\text{mol l}^{-1}$)、およびクロロフィルa濃度($\mu\text{g l}^{-1}$)の季節変化

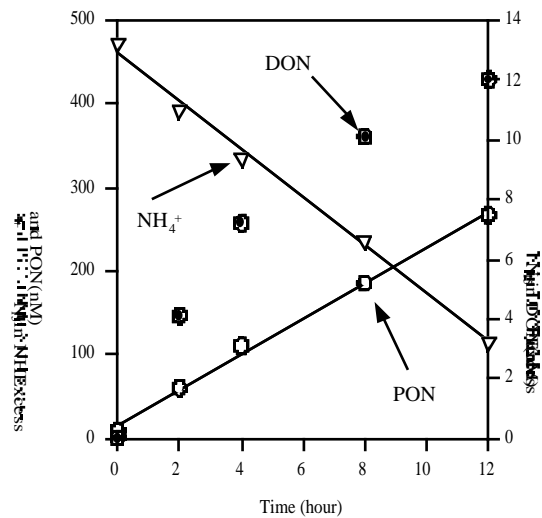


図4 厚岸湾表面海水(1998年6月)を用いた培養実験における NH_4^+ 、懸濁態有機窒素(PON)および溶存態有機窒素(DON)中の ^{15}N 量の変化。図中の直線は回帰直線。

表1 厚岸湾表面海水を用いたサイズ分画培養実験後の懸濁態有機窒素 (PON)、溶存態有機窒素 (DON)中の¹⁵N濃度 (nM) および全有機態¹⁵N生産に対する溶存態有機¹⁵N生成の百分率 (PER) . 数値は平均値 (± レンジ) .

	25 May		29 June		24 Aug.	
	< 20 μm	< 94 μm	< 20 μm	< 94 μm	< 20 μm	< 94 μm
PON	95 (±1.3)	222 (±0.17)	103 (±1.0)	125 (±4.2)	41 (±4.2)	266 (±11)
DON	6.6 (±0.07)	8.3 (±0.32)	4.5 (±0.92)	6.5 (±0.40)	4.4 (±1.8)	7.6 (±0.03)
PER	6.5 (±0.02)	3.6 (±0.13)	4.1 (±0.77)	4.9 (±0.44)	9.9 (±4.5)	2.7 (±0.12)

表2.厚岸湾表面海水中の微小動物プランクトンによる溶存態有機窒素生成速度およびバクテリアによる消費速度 (nmol l⁻¹ h⁻¹)

	12 Mar.	28 May	2 July	27 Aug.	12 Nov.
生成	7.7	6.0	15	12	15
消費	6.9	4.3	8.5	7.4	15

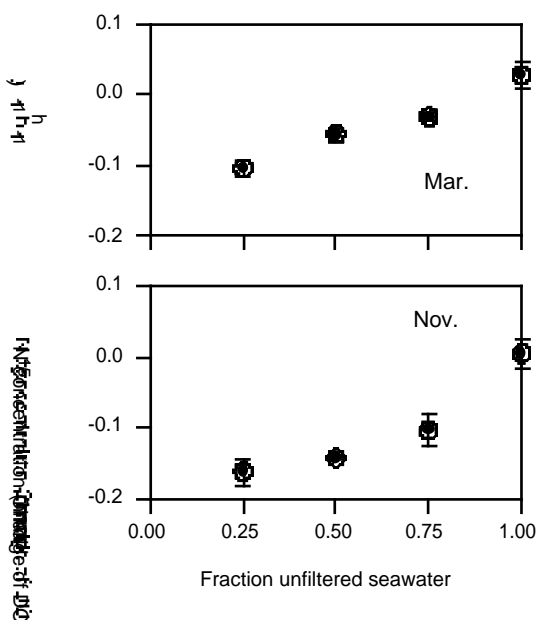


図5 厚岸湾表面海水を用いた希釈実験 (2連) における溶存態有機窒素中の¹⁵N濃度の変化の平均値およびレンジ .

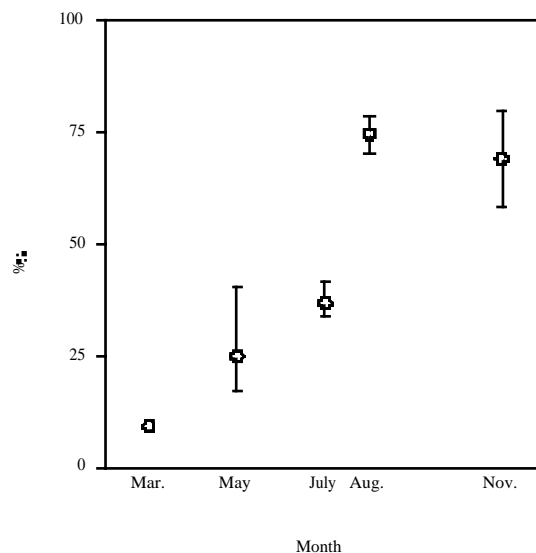


図6 厚岸湾で採集されたCopepodsが懸濁態分画から除去した¹⁵N量に対するCopepodsの体内に蓄積した¹⁵N量の百分率の平均値およびレンジ . 3, 5, 7月 (n = 3)、8, 11月 (n = 2) .

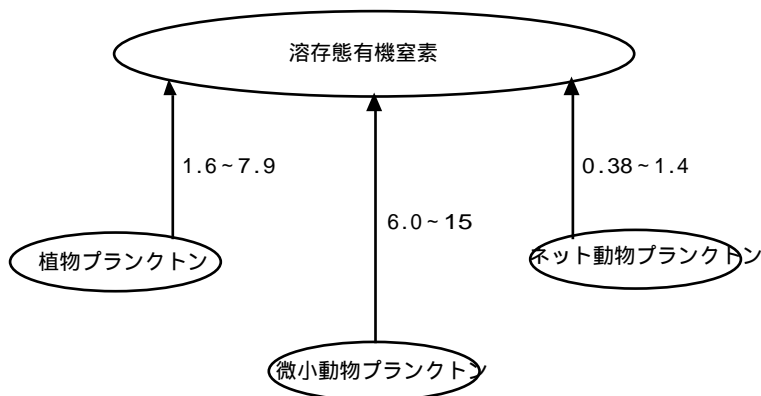


図7 厚岸湾 (1998年) の各プランクトン群集による溶存態有機窒素の生成速度 (nmol l⁻¹ h⁻¹)